

**XXIII Seminarium  
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW  
Zakopane, 15-17 marca 2017**

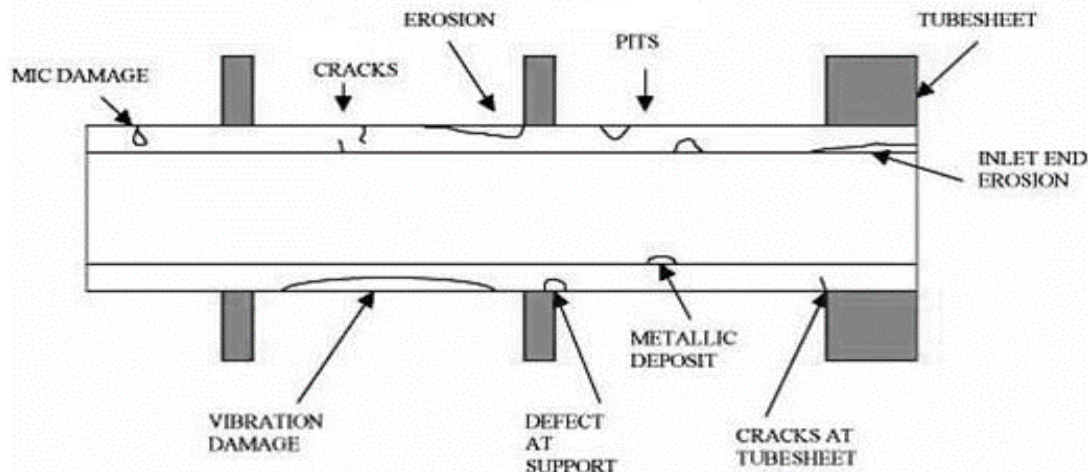
**BADANIA DIAGNOSTYCZNE RUR WYMIENNIKÓW CIEPŁA  
Z ZASTOSOWANIEM TECHNIK NIENISZCZĄCYCH.**

Dominik KUKLA (IPPT PAN Warszawa), Andrzej ZAGÓRSKI (WIM PW Warszawa),  
Rafał MIŚ (Olympus Polska), Mirosław WYSZKOWSKI (IPPT PAN Warszawa)  
[dkukla@ippt.pan.pl](mailto:dkukla@ippt.pan.pl)

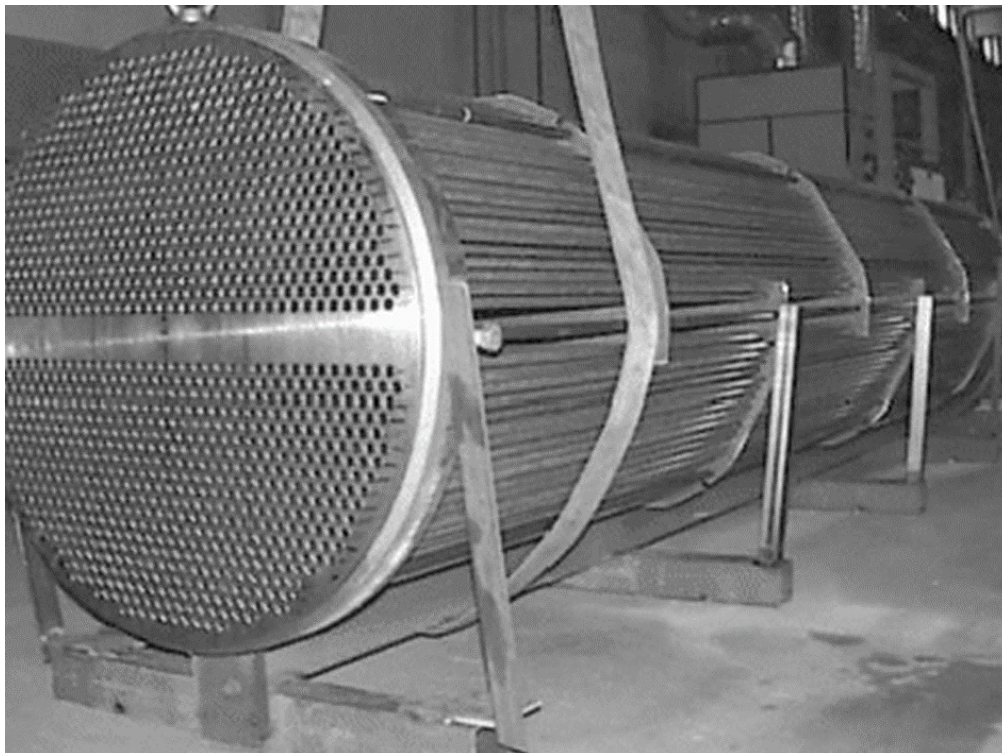
## 1. WPROWADZENIE

Wymienniki ciepła stanowią element wielu instalacji przemysłowych, a także urządzeń powszechnie stosowanych w życiu codziennym. W warunkach przemysłowych najczęściej mamy do czynienia z wymiennikami płaszczowo rurowymi, w których wiązki rur cienkościennych przebiegają wewnątrz cylindrycznego płaszcza. Wymiana ciepła zachodząca pomiędzy cieczą płynącą wewnątrz rur a cieczą na zewnątrz powoduje, w zależności od warunków eksploatacji, tworzeniu się osadów (zakrzepowych, chemicznych, korozyjnych), a także powstawaniu defektów. Jedną z przyczyn degradacji rur wymienników jest korozja (dotyczy to głównie ferrytycznych), której charakter i szybkość determinowana jest takimi czynnikami jak: temperatura pracy, agresywne substancje chemiczne (np. [kwasy](#)), naprężenia w wymienniku (np. wynikające z błędów konstrukcyjnych), skraplanie i gromadzenie się wody na dnie wymiennika (brak zaworów odprowadzających), czy obecność szczelin lub wad materiałowych. Inna przyczyna powstawania defektów wynika z erozji, w efekcie której dochodzi do pocienienia grubości ścian rurek, a w konsekwencji do perforacji. Obszarami szczególnie narażonymi na erozję są różnego rodzaju zwężenia oraz zgięcia (np. kolanka). Erozji sprzyja zły dobór materiałów, wysokie ciśnienia i wibracje powstające pod wpływem pulsacji płynów przepływających przez rury generujące cyklicznie obciążenia zmienne. Naprężenia wynikające z tego typu obciążeń, podobnie jak naprężenia cieplne, powinny być kompensowane, jednak w przypadku lokalnego spiętrzenia naprężenia może dojść do inicjacji pęknięcia [1]. Inne miejsca sprzyjające powstawaniu uszkodzeń to obszary kontaktu rur z przegrodami, które mają za zadanie zwiększyć burzliwość ruchu płynu wewnątrz płaszcza oraz podtrzymywać rury. Na rys. 1. pokazano typowe defekty występujące w rurach eksploatowanych wymienników ciepła.

Rys. 1. Typowe defekty rur wymienników[2].



Do produkcji rur wymienników ciepła, w zależności od warunków pracy, stosuje się: stale austenityczne, ferrytyczne, ferrytyczno-austenityczne (duplex) oraz stopy niklu, miedzi, tytanu. Dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy wymienników wskazana jest diagnostyka stanu rur. W tym celu stosowane są nieniszczące techniki badawcze, które pozwalają na identyfikację i lokalizację wad mających charakter nieciągłości, nie wpływając jednocześnie na jego właściwości strukturalne i powierzchniowe. Ze względu na ograniczony dostęp do powierzchni rur w wymienniku ciepła (rys. 2) ocena ich stanu możliwa jest z reguły, tylko od strony płyty (dna) sitowej.

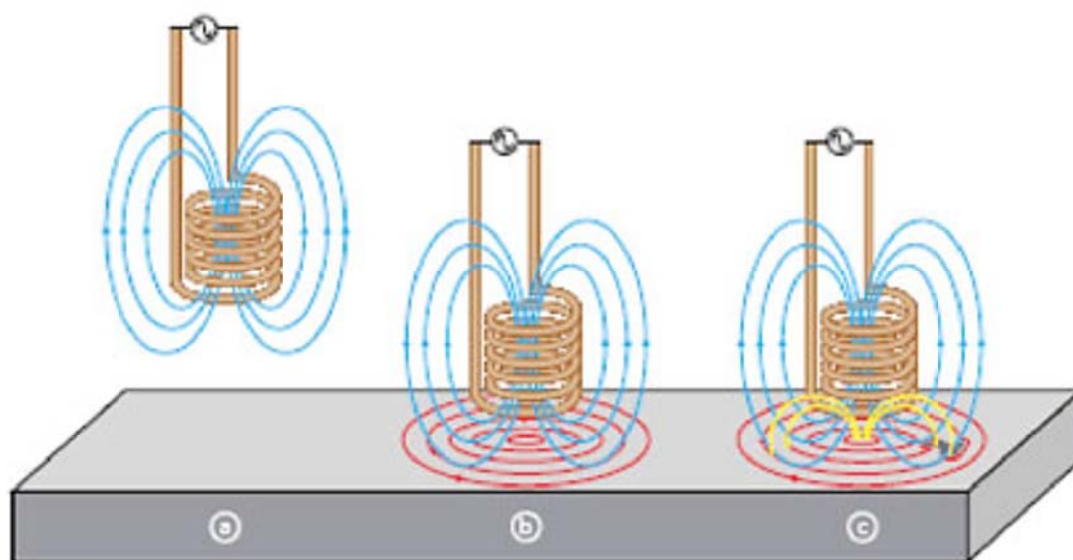


Rys. 2. Rurowy wymiennik ciepła [3]

Dlatego też, spośród nieniszczących technik badawczych, największe zastosowanie w diagnostyce rur mają metody elektromagnetyczne oparte na indukcji prądów wirowych oraz metody ultradźwiękowe. Umożliwiają one ocenę niemal całej objętości materiału rury poprzez wprowadzenie do niej głowicy lub sondy badawczej.

## 2. PRĄDY WIROWE – PODSTAWY

Metoda prądów wirowych należy do grupy metod elektromagnetycznych. Wykorzystuje ona zasadę indukcji elektromagnetycznej do lokalizacji pęknięć powierzchniowych lub podpowierzchniowych, pomiaru grubości warstw i powłok oraz sortowania metali. Badane mogą być tylko wyroby przewodzące prąd elektryczny (konduktywne) generalnie na głębokość od kilku do kilkunastu milimetrów. Sonda badawcza zbudowana jest z cewki zasilanej prądem zmiennym, dzięki czemu indukowane jest zmienne pole magnetyczne. Pole to, z kolei indukuje w badanym materiale prądy wirowe. Występujące w materiale defekty, zmiany grubości lub struktury wpływają na przepływ prądów wirowych oraz pola magnetycznego, a ostatecznie na wielkość fazy napięcia w cewce, co umożliwia detekcję ww. zmian. Metoda prądów wirowych umożliwia wykrywanie nieciągłości materiałowych, przede wszystkim wychodzących na powierzchnię obiektów (półwyrobów i wyrobów gotowych), o różnorodnych kształtach, geometrii i wielkości. Ważnymi obszarami zastosowania metody prądów wirowych są badania półwyrobów i wyrobów końcowych, podczas procesów ich wytwarzania [4]. Zasadę indukcji prądów wirowych w materiale konduktywnym pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat indukcji prądów wirowych w materiale (a) indukcja pola magnetycznego przez cewkę zasilana prądem zmiennym (b) indukcja prądów wirowych w materiale konduktywnym (c) indukcja wtórnego pola magnetycznego przez prądy wirowe, które wchodzi w interakcję z polem pierwotnym [5]

Metoda prądów wirowych (ET) jest metodą porównawczą, wymagającą stosowania wzorców lub próbek referencyjnych, o zdefiniowanych parametrach (defektów, konduktywności, grubości) celem kalibracji sygnału. Jest ona wykorzystywana w diagnostyce przemysłowej w branży chemicznej, maszynowej, lotniczej, rafinerijnej, cukrowniczej, papierniczej, spożywczej, kosmicznej, ze szczególnym uwzględnieniem badania rurek wymienników ciepła w elektrowniach jądrowych i konwencjonalnych.

Prądy wirowe oraz zjawiska towarzyszące indukcji elektromagnetycznej stanowią podstawę wielu technik diagnostycznych, z których część została opracowana do badania rur z materiałów konduktywnych.

### 3. BADANIE RUR Z WYKORZYSTANIEM PRĄDÓW WIROWYCH

Spośród technik badawczych dedykowanych do badania rurek większość wykorzystuje metody elektromagnetyczne. W zależności od materiału rur i jego właściwości magnetycznych oraz charakteru defektów jakie mają podlegać detekcji stosuje się różne techniki badawcze, z których do najpopularniejszych należą:

- ECT (Eddy Current Testing) – klasyczna metoda prądów wirowych
- RFT (Remote Field Testing) – badanie w polu dalekim
- NFT (Near Field Testing) – badanie w polu bliskim
- MFL (Magnetic Flux Leakage) - pomiar wycieku strumienia magnetycznego
- IRIS (Internal Rotating Inspection System) – ultradźwiękowy system kontroli
- ECA (Eddy Current Array) – prądy wirowe z wykorzystaniem sond wielocewkowych
- PEC (Pulsed eddy current) – Impulsowe prądy wirowe
- XRFT (Externally Referenced Remote) – badanie w polu dalekim z zewnętrzną referencją.
- ACFM (Alternating Current Field Measureme) - pomiar pola magnetycznego prądu przemiennego

Badanie rurek wymienionymi technikami jest z reguły przeprowadzane poprzez skanowanie wnętrza rur sondą pomiarową, co pozwala zidentyfikować defekty zlokalizowane na wewnętrznej i/lub zewnętrznej ścianie rury. Defekty te są z reguły wynikiem korozji, erozji, perforacji, wżerów, pęknięć zmęczeniowych czy korozji międzykrystalicznej i naprężeniowej, zagnieceń, wytarć i objawiają się jako lokalne pocienienie grubości ścianki. Sonda badawcza powinna mieć odpowiednią średnicę, mieszczącą się w zakresie określonym przez tzw. wsp. wypełnienia. Współczynnik ten jest równy stosunkowi kwadratów średnicy sondy i średnicy badanej rurki (1)

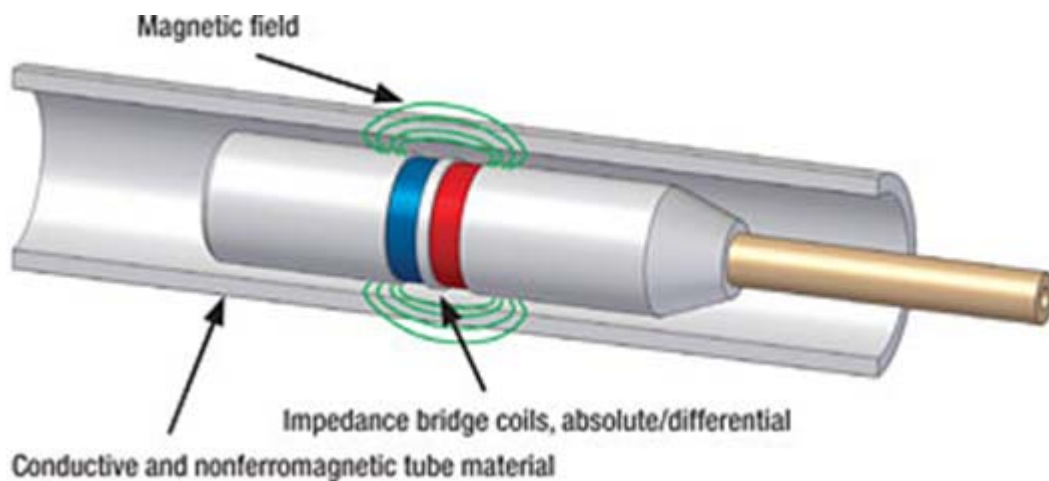
Współczynnik wypełnienia = (1)

W badaniach rurek metodami elektromagnetycznymi zalecane jest zachowanie tego stosunku na poziomie nie mniejszym niż 0,7. W przypadku technik ultradźwiękowych konieczne jest sprzężenie akustyczne pomiędzy głowicą a powierzchnią badaną.

#### 3.1. Metoda ECT

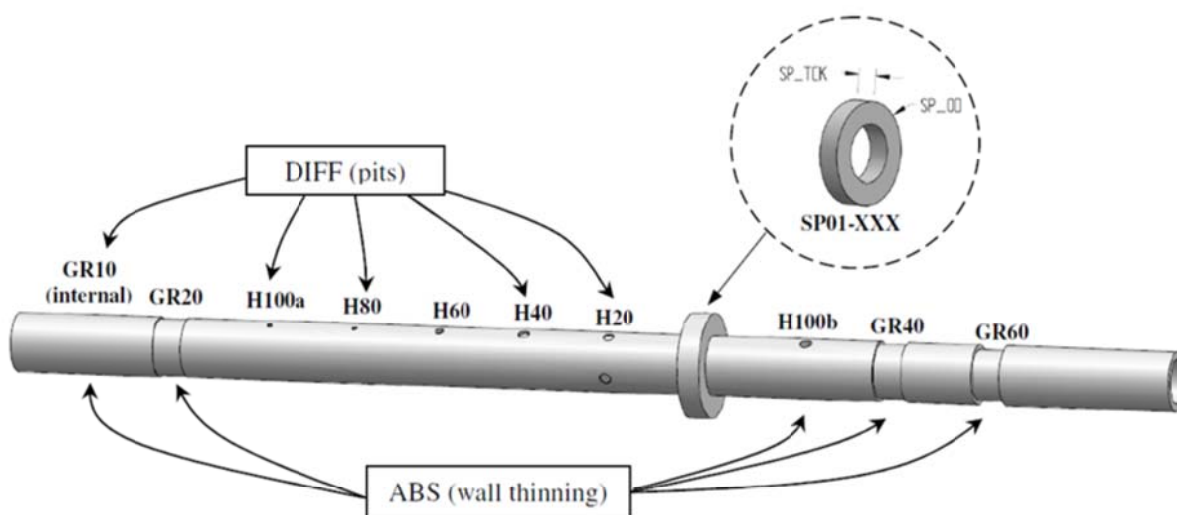
Klasyczna metoda elektromagnetyczna polegająca na indukcji prądów wirowych w materiale nieferromagnetycznym. Technika ta jest przeznaczona do wykrywania i wymiarowania

nieciągłości w materiale rury, takich jak korozja, erozja, zużycie, wżery, ubytki grubości, pęknięcia i perforacje. Zasada działania przedstawiona schematycznie na rys. 4, polega na wytworzeniu pola magnetycznego wokół dwóch cewek wzbudzonych prądem zmiennym. Pole to przenika materiał rury i generuje prądy wirowe, których rozkład jest zaburzany przez wady w materiale, co wpływa na zmiany impedancji cewek. Metoda ta dedykowana jest do detekcji wad zarówno na powierzchni wewnętrznej jak i zewnętrznej w materiałach nieferromagnetycznych, takich jak stale austenityczne, stopy tytanu i miedzi (brązy i mosiądze). W przypadku rur z materiałów ferromagnetycznych możliwa jest tylko detekcja defektów powierzchniowych z uwagi na ograniczone wnikanie prądów wirowych (efekt naskórkowości) [5, 6].



Rys. 4. Schemat działania sondy w metodzie ECT

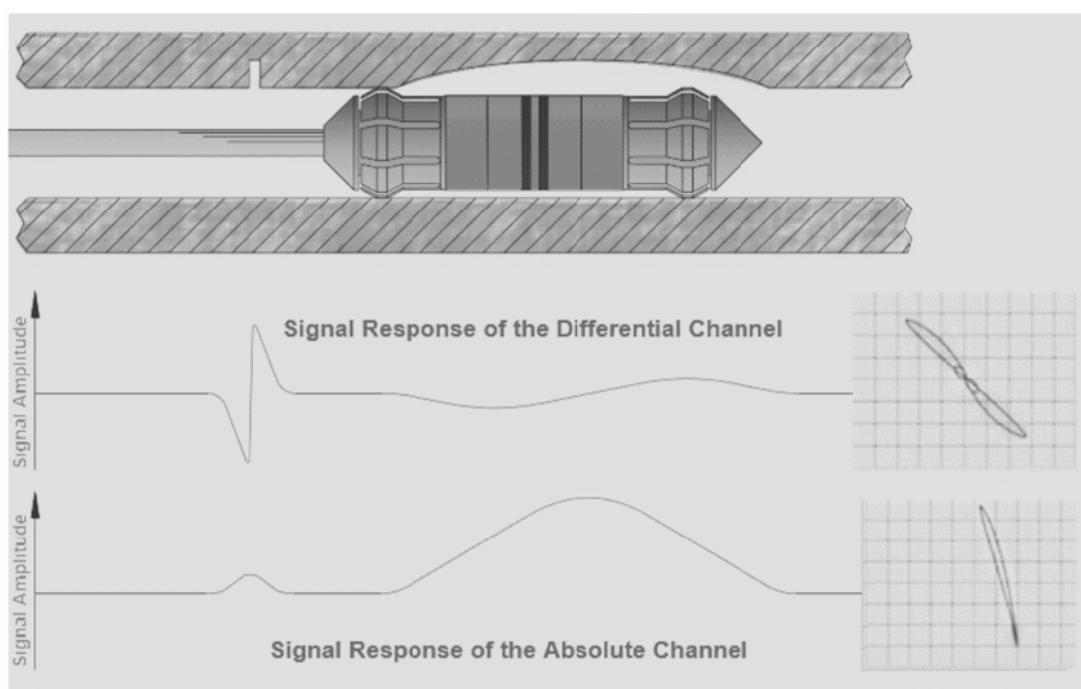
Ponieważ metoda prądów wirowych jest metodą porównawczą wymagana jest kalibracja urządzenia na wzorcu lub próbce referencyjnej. Na rys. 5. przedstawiono geometrię defektów na przykładowej rurce wzorcowej, rekomendowanej przez jednego z producentów systemów do badania rur metodą ECT. Wzorzec taki powinien posiadać lokalne podtoczenia na głębokości 20, 40 i 60% nominalnej grubości ścianki rurki, podtoczenie wewnętrzne (10%) oraz otwory płaskodenne i otwór przelotowy. Wskazane jest także zastosowanie pierścienia symulującego przegrodę, tak aby móc „usunąć” wskazania od przegród podczas badania wymiennika. Jest to możliwe w urządzeniach wielokanałowych, gdzie sonda pracuje na różnych częstotliwościach i dostępny jest dodatkowy kanał MIX. Wykonanie kalibracji z zastosowaniem wzorca umożliwia określenie charakteru defektów zidentyfikowanych podczas badania oraz ich precyzyjne zwymiarowanie [5].



Rys. 5. Przykładowy schemat próbki referencyjnej (wzorca), z ubytkami symulującymi najczęściej występujące defekty w materiale rurek wymienników.

Wytyczne do projektowania rurek kalibracyjnych dla wszystkich prezentowanych technik zawarte są w odpowiednich normach ASME oraz DIN.

W nowoczesnych systemach badawczych wykorzystujących technikę ECT możliwa jest analiza sygnału otrzymanego zarówno w trybie sondy absolutnej (pojedyncza cewka) jak i sondy różnicowej (dwie cewki). W trybie cewki absolutnej lepiej identyfikowane są defekty stopniowe, takie jak erozja materiału. Z kolei tryb różnicowy jest bardziej wrażliwy na defekty lokalne, takie jak korozja, wżery, czy pęknięcia. Przebieg sygnału w obu trybach, wraz z charakterem wskazań pokazano na rys. 6.



Rys.6. Przebieg sygnału różnicowego i absolutnego cewki dla wady lokalnej i stopniowej [7].

Istotny jest także odpowiedni dobór częstotliwości pracy przetwornika, która determinuje głębokość wnikania prądów wirowych w materiale, zgodnie z zależnością (2)

$$(2)$$

$\delta$  - głębokość wnikania pola magnetycznego, do materiałów, w mm,

$f$  - częstotliwość pracy przetwornika, w Hz,

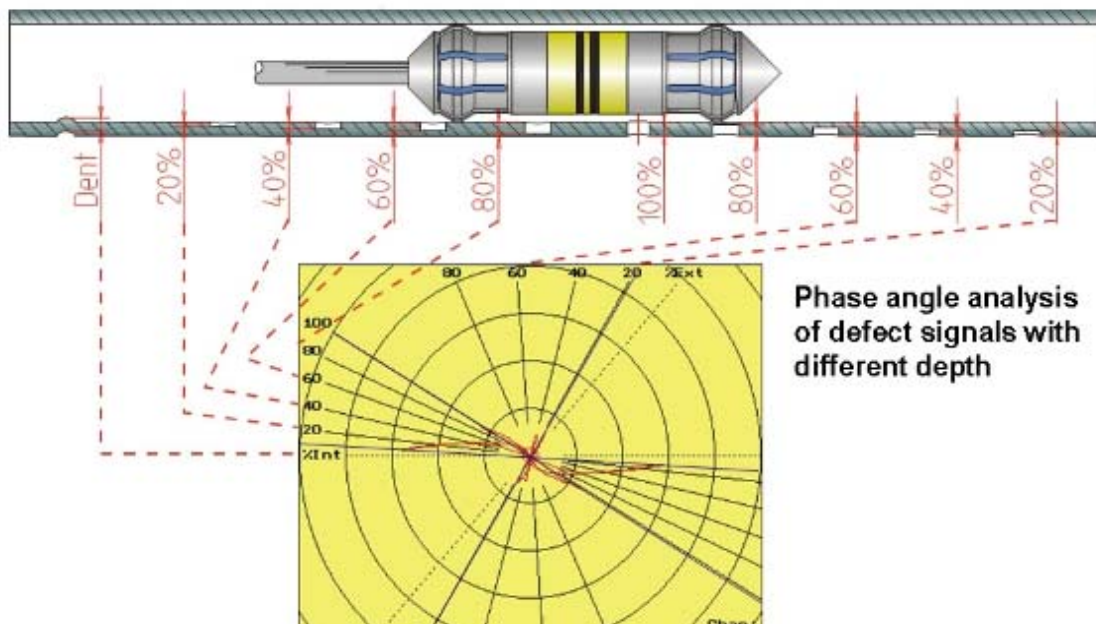
$\sigma$  - przewodność elektryczna właściwa materiału, w S/m,

$\mu_r$  – przenikalność magnetyczna względna materiału

Ustawienia częstotliwości powinny zapewnić wzbudzenie prądów wirowych do głębokości przekraczającej grubość ścianki badanej rury. Pozwoli to na ocenę stanu w całej objętości materiału rury oraz identyfikację defektów zarówno na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej rury [8].

Kalibracja przeprowadzona na wzorcu (próbce referencyjnej – rys.5) pozwala uzyskać charakterystykę od wad wzorcowych o różnej głębokości. Dzięki temu możliwa jest ilościowa ocena wad (głębokość), w oparciu o zmienne wartości kąta fazowego sygnału. Efekt ten pokazano na rys. 7.

Sondy do badania techniką ETC dostępne w komercyjnej ofercie takich producentów jak OLYMPUS, EDDYFI, czy ZETEC pozwalają na badanie rur z metali nieferromagnetycznych w zakresie średnic od 10 do 50 mm. Badanie realizowane poprzez skanowanie rury może odbywać się z prędkością nawet do 10 m /s.

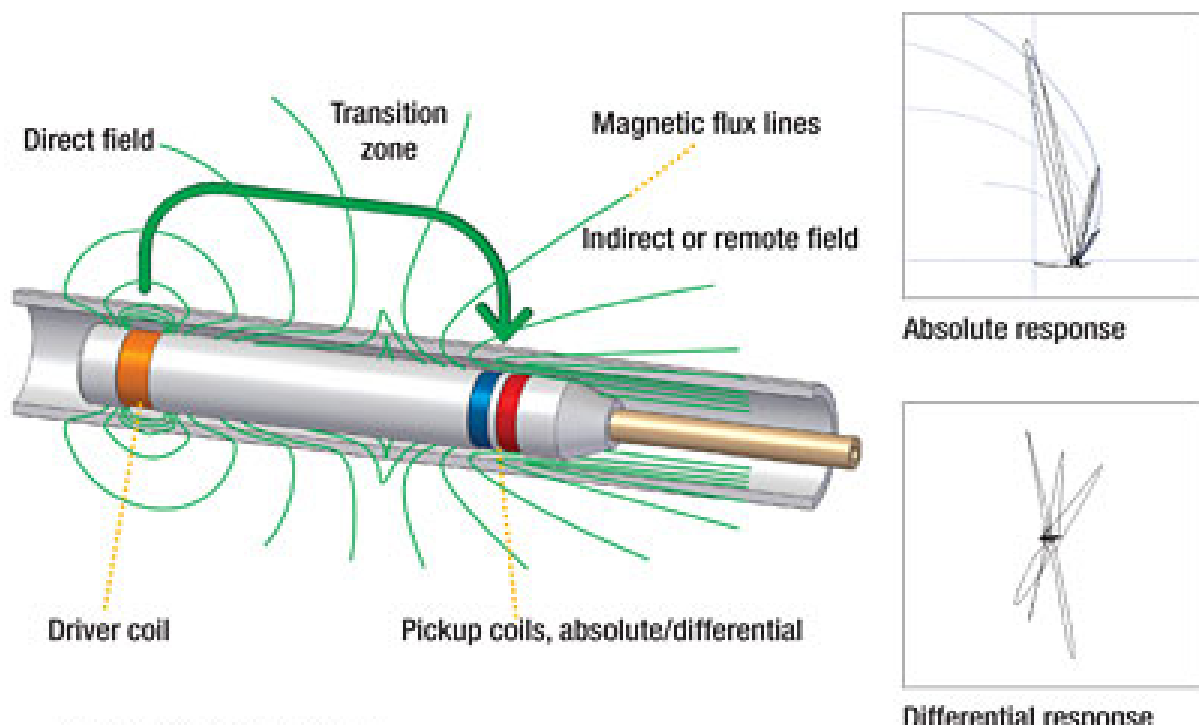


Rys. 7. Zmiana wartości kąta fazowego sygnału prądowirowego w funkcji głębokości i charakteru wady [7].

### 3.2. Metoda RFT

Jest to metoda dedykowana do badania rurek z materiału ferromagnetycznego, w których poważnym ograniczeniem jest mała głębokość wnikania prądów wirowych związana z wysoką wartością przenikalności magnetycznej. Jak wynika z zależności (2) jest to relacja odwrotnie proporcjonalna co powoduje intensyfikację tzw. efektu naskórkowości czyli ograniczenia indukcji prądów wirowych w ferromagnetykach do obszaru powierzchniowego.

Sonda do badania techniką RFT składa się z cewki wzbudzającej prądy wirowe w materiale rury oraz cewki odbiorczej, znajdującej się w odległości 2-3 średnic rury od cewki pierwszej, czyli w strefie oddziaływania tzw. „pola dalekiego”. Pierwotne pole magnetyczne rozchodzi się przez ściany rury wzdłuż rury i dociera do cewki odbiorczej. Defekty zlokalizowane zarówno na wewnętrznej jak i zewnętrznej powierzchni rury, powodują „znieskształcenie” pola, które odbierane jest przez detektor. Dzięki analizie porównawczej parametrów magnetycznego pola dalekiego oraz pola pierwotnego możliwa jest identyfikacja tych wad. Schemat wyjaśniający działanie sondy w technice RFT pokazuje rys. 8. Technika ta z reguły stosowana jest do badania rur z materiałów ferromagnetycznych, na obecność uszkodzeń w postaci ubytków grubości ścianki takich jak erozja, korozja, perforacje, pęknięcia, wżery i wytarcia. Przedmiotem badań najczęściej są rury w podgrzewaczach przepływowych, wymiennikach ciepła, piecach oraz chłodnicach[6].



Rys. 8. Schemat pracy sondy w technice RFT

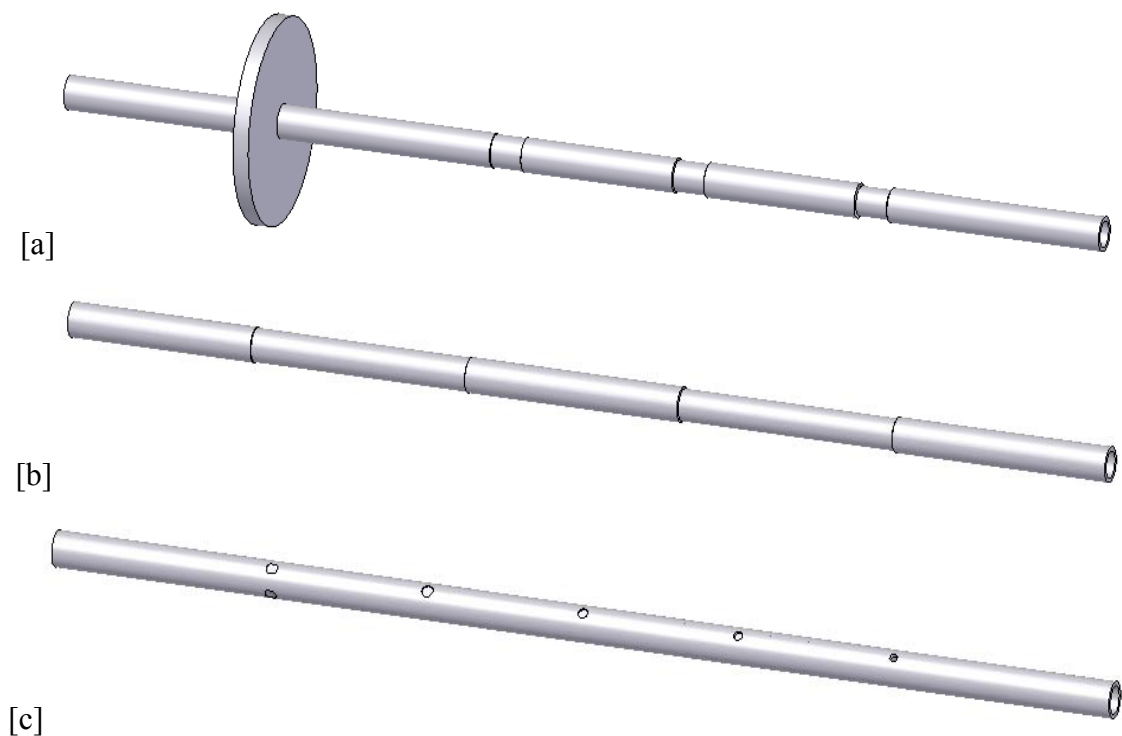
Obraz ubytków korozyjnych w materiale rur, które wykrywane są z zastosowaniem techniki RFT pokazano na rys. 9 [5].





Rys. 9. Ubytki korozyjne na rurach stalowych

Do kalibracji sygnały w metodzie RFT, tak jak we wszystkich technikach elektromagnetycznych, konieczne jest stosowanie próbek wzorcowych (referencyjnych). Wzorce te powinny posiadać rowki długie (rys. 10a) i rowki krótkie (rys. 10b) imitujące ubytki erozyjne oraz otwory płaskodenne (rys. 10c) imitujące wżery i ubytki lokalne. Wskazane jest także uwzględnienie przegrody (rys. 10a) aby sygnał od niej mógł być eliminowany w analizie danych. Wielkości wad zależne są od średnicy rurki i są podane m. in w normach DIN, ASTM oraz w materiałach producentów sond [9].

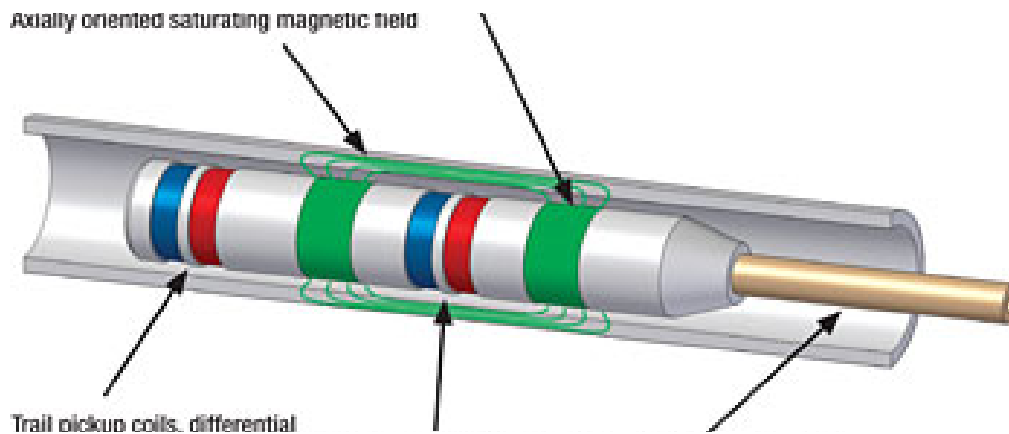


Rys. 10. Przykłady defektów na próbkach referencyjnych dla metody RFT

Ograniczenia techniki RFT związane są ze stosunkowo małą czułością na wżery, brak możliwości wykrycia defektów pod przegrodą i niewielkie, przy przegrodzie (w tym celu można stosować sondy dedykowane z podwójną cewką wzbudzającą)

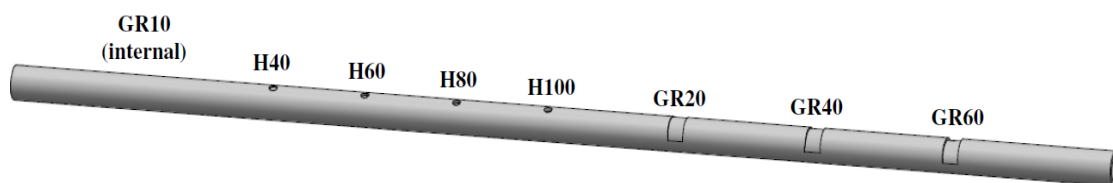
### 3.3 Metoda MFL

Metoda pomiaru wycieku strumienia magnetycznego polega na magnesowaniu materiału badanej rury silnym magnesem znajdującym się w sondzie badawczej. Tym samym materiał jest nasycony magnetycznie, a jego przenikalność magnetyczna obniżona, co pozwala zwiększyć głębokość wnikania indukowanego pola. Pomiedzy biegunami magnesu znajduje się sonda wraz z czujnikami efektu Halla, które rejestrują lokalne zmiany strumienia magnetycznego. Są one efektem interakcji pola magnetycznego indukowanego przez cewkę oraz wycieku strumienia magnetycznego powstałego od nieciągłości materiałowych zlokalizowanych w obszarze [5, 6] badania. Schemat działania sondy w technice MFL przedstawia rys. 11.



Rys. 11. Schemat działania sondy w technice MFL [5]

Metoda MFL stosowana jest do badania rurek ferromagnetycznych uźebrowanych (np. aluminium), w zakresie oceny ubytków grubości ścianki w postaci wżerów, rowków obwodowych i pęknięć. Podobnie jak w przypadku innych technik opartych na indukcji elektromagnetycznej badanie powinno być poprzedzone kalibracją sygnału na próbce wzorcowej. Dedykowaną przez ASTM geometrię i rozmiar wad dla techniki MFL pokazano na rys. 12 [9].



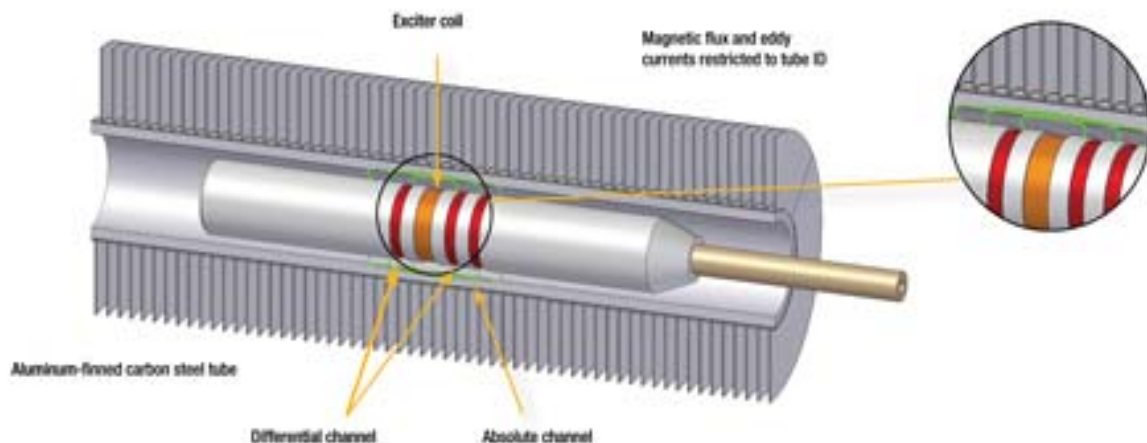
Rys. 12. Rysunek próbki wzorcowej dla techniki MFL

W tej technice trudno mówić o wymiarowaniu wad, a jedynie ich identyfikacji. Należy także uwzględnić zależność sygnału od szybkości prowadzenia sondy.

### 3.3. Metoda NFT

Badanie w polu bliskim jest techniką dedykowaną do inspekcji rur ze stali węglowej typu finfan. Technika ta pozwala wykrywać efekty korozji, erozji i korozji wżerowej na wewnętrznej powierzchni rury. W metodzie tej indukcja prądów wirowych ograniczona jest do grubości

ścianki, aby uniknąć zakłóceń od zębrowania ferromagnetycznego. Schemat sondy pracującej w technice NFT pokazano na rys. 13.

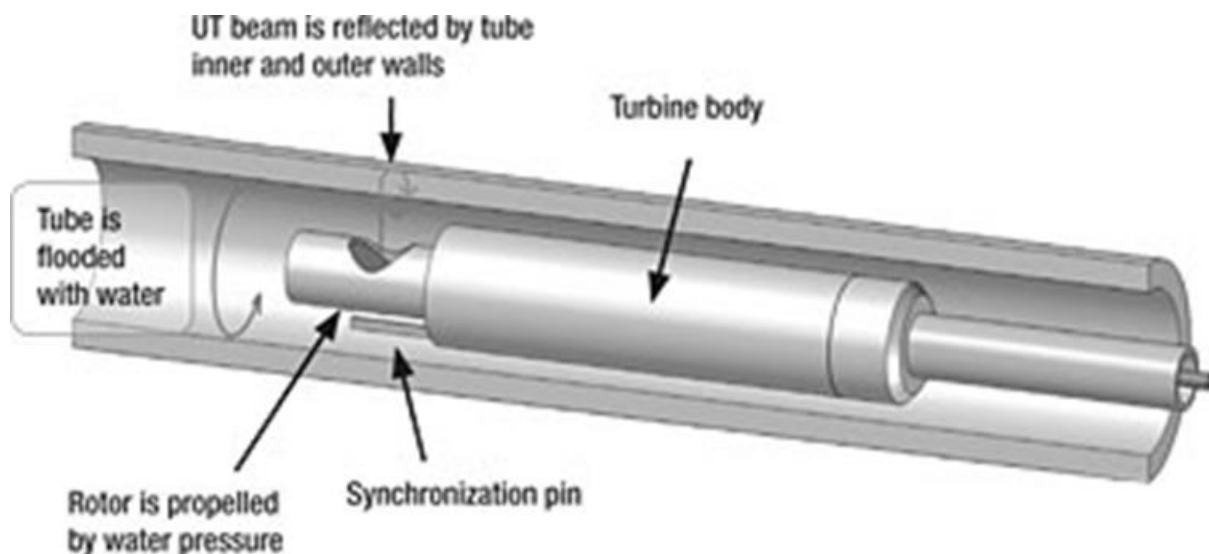


Rys. 13. Budowa sondy do badań w technice NFT [5]

Sonda NFT zbudowana jest z cewki nadawczej oraz z cewek odbiorczych, w układzie różnicowym i absolutnym, znajdujących się w pobliżu cewki nadawczej, czyli w obszarze pola bliskiego - to jest w strefie, gdzie pole magnetyczne cewki nadawczej wywołuje silne prądy wirowe, ukierunkowane osiowo i promieniowo w materiał rury. Zakres częstotliwości pracy dla tej techniki jest podobny jak w przypadku techniki RFT. Z uwagi na ograniczenia metody do badania tylko na obecność defektów wewnętrznych próbka referencyjna powinna zawierać co najmniej dwa ubytki tego typu, o różnej głębokości.

### 3.4. Metoda IRIS

Ultradźwiękowa metoda IRIS pozwala na detekcję wad powierzchniowych, wewnętrznych i zewnętrznych oraz wad objętościowych w rurach z materiałów żelaznych, nieżelaznych i niemetalicznych. Technika ta polega na skierowaniu fali ultradźwiękowej na wewnętrzną powierzchnię badanej rury. Fala ta emitowana jest przez sondę obrotową, zasilaną małą turbiną wodną. Dzięki temu sonda wykonuje ruch obrotowy i posuwisty, a jednocześnie woda, która wypełnia całą rurę zapewnia, wymagane w metodzie ultradźwiękowej, sprzężenie akustyczne. Zasada działania sondy w technice IRIS pokazana jest na rys. 14. Badania techniką IRIS umożliwiają wykrycie zmian grubości rury jako efekt korozji, erozji, zużycia, wżerów. Nieco mniejszą czułość wykazuje w detekcji wad liniowych jak np. pęknięcia. Badanie wymaga oczyszczenia i odpowietrzenia rur oraz stałego podawania wody, co stanowi pewne ograniczenie. Technikę można stosować do inspekcji rur w zakresie średnicy od 10 do 75mm [5, 6].



Rys. 14. Schemat głowicy IRIS [5]

Technika IRIS jest dedykowana szczególnie dla rur ferromagnetycznych ponieważ pozwala uzyskać dużą większą skuteczność w detekcji uszkodzeń w porównaniu z RFT.

#### 4. INNE METODY NIEELEKTROMAGNETYCZNE

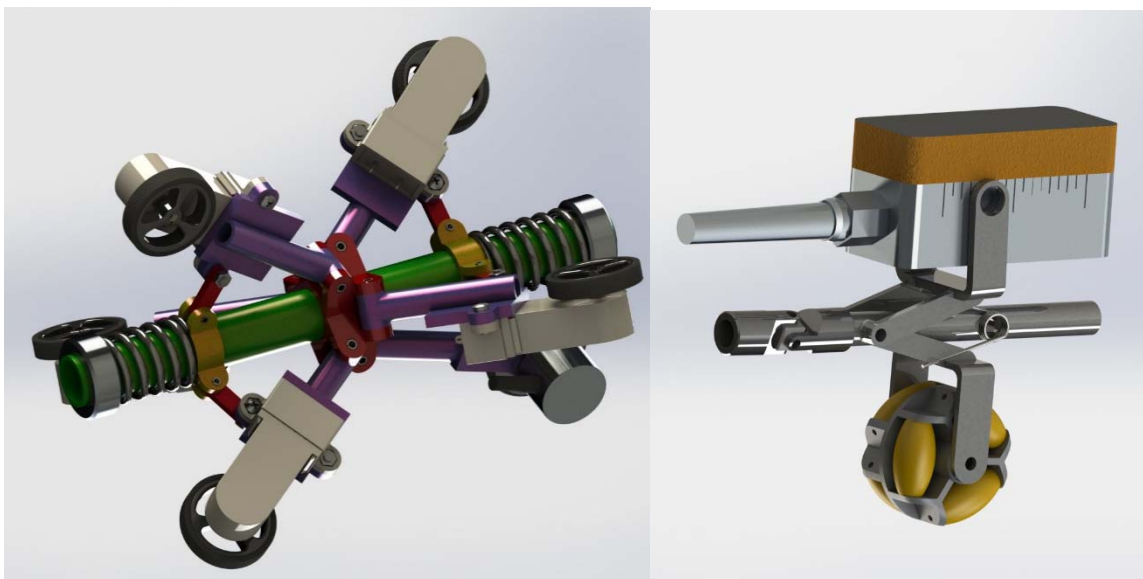
Spośród nieniszczących metod stosowanych do diagnostyki rur największą dynamikę rozwoju wykazują te wykorzystujące falę ultradźwiękową lub emisję akustyczną. Można tu wymienić m. in.

- Guided Wave Ultrasonics / Long Range Ultrasonic Testing – badanie za pomocą ultradźwiękowej fali ukierunkowanej (Guided Wave UT) jest stosowane do skanowania długich odcinków rurociągów, również rurociągów z utrudnionym dostępem, izolowanych i podziemnych. Metoda fali ukierunkowanej UT wykorzystuje fale niskiej częstotliwości, które są transmitowane wzdłuż rurociągu. Metoda pozwala wykryć uszkodzenia i korozję na wewnętrznej lub zewnętrznej powierzchni rurociągu. Długość badanego odcinka zależy m.in. od rodzaju izolacji, lokalizacji rurociągu i może wynosić od kilku do kilkudziesięciu metrów. Guided Wave Ultrasonics jest skuteczną i szybką metodą, dzięki temu, że badanie można wykonywać na długim odcinku pracującego rurociągu.
- Lixi Profiler - ma zastosowanie do badania rur izolowanych bez potrzeby zdejmowania izolacji. Urządzenie mierzy różnice w gęstości materiałów (stal, kompozyty, tworzywa sztuczne, guma). Lixi Profiler to skuteczna metoda detekcji korozji pod izolacją, monitoringu grubości ścian rur, zmian w materiale czy miejsc występowania spoin w rurociągach. W trakcie badania wykorzystywany jest izotop o niskim promieniowaniu - Gadolinium 153, dzięki czemu nie jest konieczne wydzielenie miejsca pracy.

- FST-GAGE – metoda ma zastosowanie w badaniu i pomiarach grubości m.in. rur kotłowych. Technika ta wykorzystuje elektromagnetyczny przetwornik akustyczny (EMAT) do transmisji i odbioru fal ultradźwiękowych. Wyniki pomiarów są bardzo dokładne +/- 0,15 mm i powtarzalne dzięki czemu można szybko i z dużą dokładnością przebadac duże powierzchnie.
- Acoustic Eye – badanie wykorzystujące metodę refleksometrii akustyczno-impulsowej (Acoustic Pulse Reflectometry) służące do badania rur wymienników ciepła, kotłów, rur spiralnych wykonanych z magnetycznych lub niemagnetycznych materiałów. Bardzo szybka i nieinwazyjna metoda badań nieniszczących mająca zastosowanie do rur o średnicach 8-104 mm i długości do 20 m. Acoustic Eye wykrywa dziury, blokady w rurze, korozję, wżery i inne wady. [10]

## 5. BADANIE RUR WIELKOŚREDNICOWYCH

Prezentowane powyżej metody elektromagnetyczne i ultradźwiękowe z reguły pozwalają na inspekcje rur o średnicach maksymalnie 50–70 mm. W przypadku rur o średnicach większych można wykorzystać wymienioną wcześniej technikę prądów wirowych z sondami wielocewkowymi. Ręczne skanowanie powierzchni wewnętrznej rur jest możliwe tylko na odcinku ok. 1 m, dlatego też można używać skanerów, które ułatwiają prowadzenia badania, także w przypadku większych powierzchni lub obszarów o ograniczonej dostępności. Na Wydziale Inżynierii Materiałowej opracowano taki skaner, pokazany na rys. 15 obsługujący także inne metodyki badawcze. Na rysunku pokazano opcję końcówki skanującej wraz z uchwytem sondy ECA.

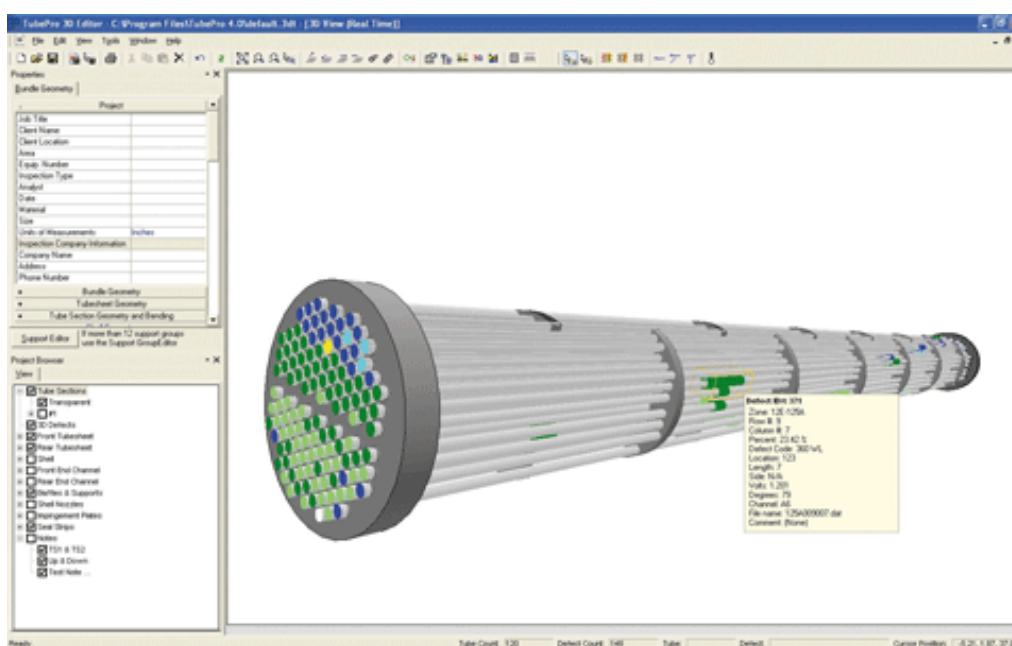


Rys. 15. Skaner do badania otworów wraz z opcjonalnym uchwytem sondy ECA.

Dzięki wykorzystaniu techniki ECA wraz z dedykowanym skanerem możliwa jest szybka i skuteczna inspekcja 100 % powierzchni wewnętrznej rur o średnicy wewnętrznej w zakresie 120–180 mm. Większe średnice wymagają opracowania skanera o innej konstrukcji i geometrii. Metoda ta pozwoli na identyfikację pęknięć ubytków korozyjnych i erozyjnych, a także przy odpowiedniej konfiguracji – pocienień grubości.

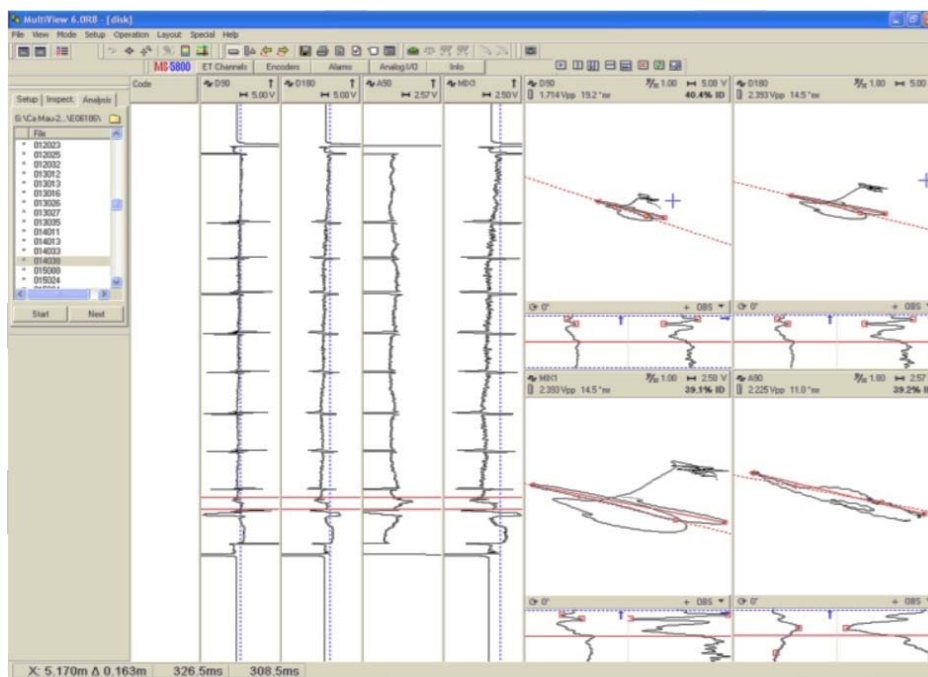
## 6. OPROGRAMOWANIE

Badania diagnostyczne wymienników prowadzone są najczęściej w celu identyfikacji rur wykazujących defekty eksploatacyjne, najczęściej w postaci znaczącego ubytku grubości ścianki, perforacji, czy pęknięcia, co może prowadzić do awarii instalacji. Dlatego też, w opracowanych raportach z badania powinna znaleźć się informacja o lokalizacji zidentyfikowanych uszkodzeń oraz ich wielkości i charakterze. Do prezentacji wyników w tym zakresie stosuje się programy, który pozwalają zaprojektować dowolny układ rur w wymienniku oraz zaimplementować dane z badania dla opracowania mapy defektów. Przykładem takiego programu jest Tube Pro (rys. 16.), który umożliwia wizualizację 3D wskazując rury defektami oraz ich położenie.



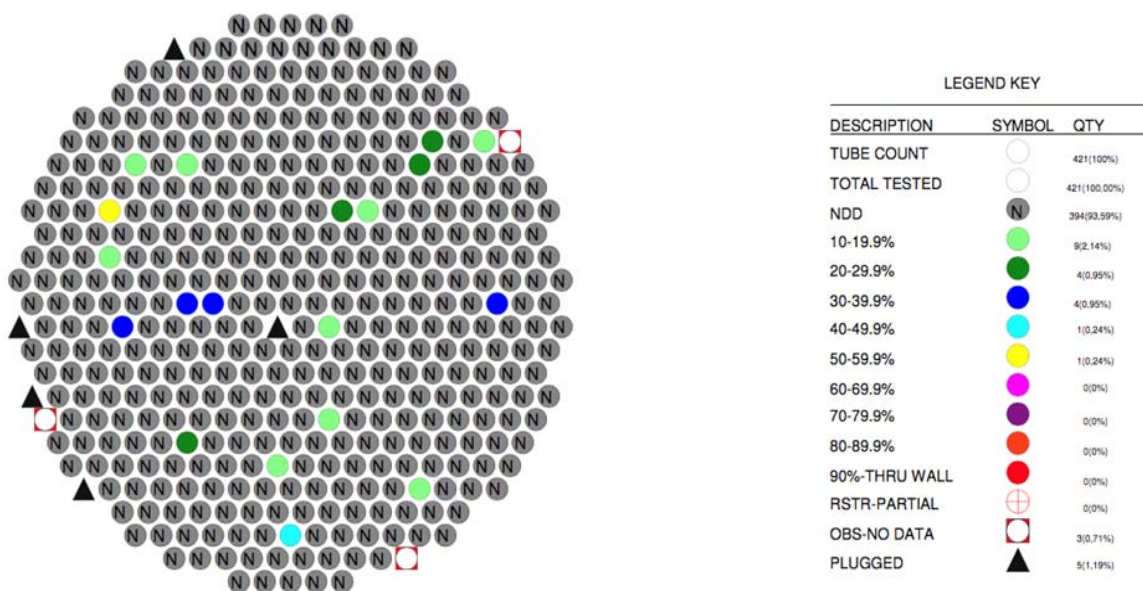
Rys. 16. Obraz wyników badania wymiennika w programie Tube Pro. [5]

Po odwzorowaniu układu rur w badanym wymienniku przystępuje się do badania z wykorzystaniem odpowiedniej techniki. Samo badanie, poprzedzone kalibracją parametrów sygnału na wzorcu, także wymaga użycia programu inspekcyjnego. Na rys. 17 pokazano obraz zmian sygnału uzyskanego podczas badania rurki, z wykorzystaniem programu MultiView. Widoczne są przebiegi sygnału od układu różnicowego jak i absolutnego z widocznymi wskazaniem w formie pików. Po prawej stronie widać trajektorie zmian dla wybranego wskazania. Na podstawie analizy porównawczej wszystkich wskazań uzyskanych na wymienniku ze wskazaniami od nieciągłości na wzorcu (kalibracja) program może ocenić wielkość tych ubytków. Wymaga to jednak wskazania i zdefiniowania defektów przez operatora. Uzyskany efekt analizy można wyeksportować do programu raportującego, celem graficznej prezentacji wyniku badania.



Rys. 17. Obraz wskazań z badania techniką ECT uzyskanych w programie MultView.

W efekcie powstaje mapa rur w wymienniku ze zidentyfikowanymi defektami, których rozmiar (głębokość) oznaczony jest procentowo (w stosunku do grubości ścianki) w ustalonych zakresach, skalą barwną lub numeryczną. Przykładową mapę wymiennika pokazana na rys. 18.



Rys. 18. Przykładowy wynik badania wymiennika, ze wskazaniem ubytków i ich ilościową oceną.

## 7. PRZYGOTOWANIE RUREK DO BADAŃ

Metody nieniszczące oparte na zjawisku indukcji elektromagnetycznej nie wymagają specjalnego przygotowania badanej powierzchni. Jednak w przypadku badania rur konieczne jest ich oczyszczenie w stopniu umożliwiającym wprowadzenie sondy do środka. Bardziej rygorystyczne wymagania stawia metoda IRIS, gdzie konieczne jest wyczyszczenie powierzchni, tak aby usunąć warstwy korozji oraz osad kamienia, które mogą ograniczyć sprężenie ultradźwiękowe. Najczęściej stosuje się przedmuch powietrzem lub wodą pod ciśnieniem, jednak proponowane są także inne rozwiązania:

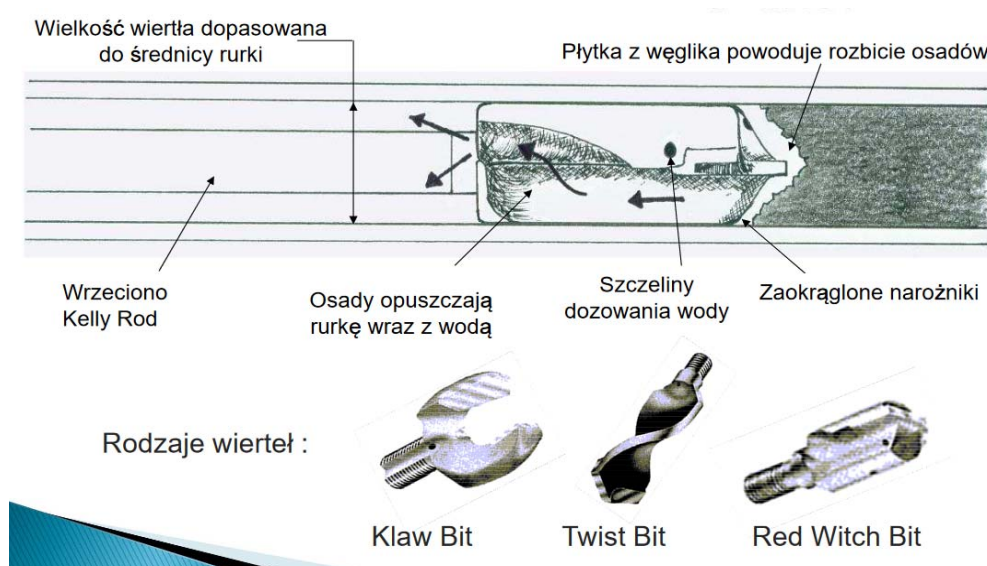
- [Czyszczenie wysokociśnieniowe do 280 MPa](#) przy użyciu lanc sztywnych, giętkich węży wysokociśnieniowych co pozwala usunąć osad kamienia kotłowego oraz osady technologiczne np. pofermentacyjne, pocelulozowe, olejowe i inne organiczne powstałe w trakcie procesów wytwórczych [11].
- Czyszczenie hydromechaniczne polegające na przestrzeliwaniu rurek nabojami posiadającymi na obwodzie metalowe ostrza o średnicy dokładnie dopasowanej do rurki. Elementem czyszczącym jest nabój wykonany ze stali sprężynowej oraz tworzywa sztucznego, posiadający 3 lub 4 pary ostrzy. Nabój przestrzeliwany jest przez całą długość rurki przy pomocy strumienia wody pod ciśnieniem około 2 MPa podawanego ze specjalnego agregatu pompowego. Nabój przemieszcza się w rurce z prędkością około 6 m/sek, a osad jest mechanicznie zeskrobywany przez ostrza, a następnie wypłukiwany przez przepływający strumień wody. Do czyszczenia potrzebna jest ilość nabołów stanowiąca ok. 10% ilości rurek w urządzeniu. Na rys. 19 przedstawiono naboje różnego typu [12].



Rys.19. Naboje czyszczące metodą hydromechaniczną

- Metoda HYDRODRIL, w której wiertło napędzane silnikiem pneumatycznym obraca się z prędkością 500-2000 obr/min. Posuw wiertła realizowany jest za pomocą cylindra hydraulicznego. Najtwardsze nawet osady są usuwane z rurek bez uszkodzenia ścianki rurki, a następnie są wypłukiwane. Metoda ma zastosowanie do wszystkich rodzajów osadów i do wszystkich materiałów rurek. Zakres średnic rurek czyszczonych to 10mm-40mm, długości rurek do 14m. Na rys. 20 Przedstawiono zasadę czyszczenia oraz różne typy końcówek czyszczących [13].





Rys.20. technika czyszczenia rur metodą HYDRODRIL

- Metoda NITROLANCE jest to metoda czyszcząca, której głównym medium jest ciekły azot. Usuwa trudne osady z twardego kamienia kotłowego i węglanu wapnia pochodzącego z wody chłodzącej, z boksytu i tlenku glinu z wysokiej gęstości polipropylenu i polietylenu [13].

## 8. PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu skupiono się na nieniszczących technikach badawczych stosowanych komercyjnie w diagnostyce rur wymienników ciepła. Przedstawione techniki wykorzystują zjawisko indukcji elektromagnetycznej oraz ultradźwięki. Każda z nich ma inne możliwości w zakresie detekcji wad, obszaru penetracji czy właściwości badanego materiału. Prądy wirowe są możliwe do wykorzystania tylko w przypadku rur z materiałów przewodzących, a w przypadku ferromagnetyków, możliwości oceny ograniczają się do powierzchni lub wykrywania wad obwodowych. Z kolei metody ultradźwiękowe są bardziej „objętościowe”, co ogranicza ich zastosowanie w detekcji pęknięć. W tabeli 1 zestawiono najczęściej stosowane techniki nieniszczące oraz ich możliwości w detekcji wad najczęściej spotykanych w eksploatowanych rurek wymienników.

Tabela 1. Zestawienie nieniszczących technik i ich możliwości

Technika	ECA	ECT	RFT	MFL	NFT	IRIS
Materiał	konduktywny	nieferro	ferro	ferro	ferro	dowolny
powierzchniowe zewnętrzne ubytki (korozja)	Tak (przy małych grubościach)	Tak	Tak	trudno	Nie	tak
powierzchniowe wewnętrzne ubytki (korozja)	Tak	Tak	Tak	tak	tak	tak
lokalne ubytki zewnętrzne	Tak (przy małych	Tak	Raczej tak	trudno	Nie	tak

(wżery)	grubościach)					
lokalne ubytki wewnętrzne (wżery)	tak	Tak	tak	tak	tak	tak
Pęknięcia obwodowe	Tak, jeśli wewnętrzne	Tak	Trudno	Trudno	Raczej tak	nie
Pęknięcia osiowe	Tak, jeśli wewnętrzne	Raczej nie	Raczej tak	nie	nie	nie

Analiza tabeli pozwala wyciągnąć wniosek, że mnogość technik badawczych do oceny stanu rurek w wymiennikach jest konsekwencją wymogów w zakresie wykrycia uszkodzeń o różnym charakterze, zlokalizowanych na pow. wewnętrznej lub zewnętrznej rury, w materiale ferro- lub nieferromagnetycznym, czy też badania rurek żebrowanych. Celem tej pracy jest przybliżenie możliwości różnych technik badawczych w zakresie diagnostyki rur oraz ich ograniczeń, tak aby świadomie planować programy badawcze dla wymienników ciepła i świadczyć usługi diagnostyczne w tym obszarze.

## LITERATURA

- [1] R. Mukherjee: Practical Thermal Design of Shell-and-Tube Heat Exchangers. 2004. [ISBN 1-56700-205-6](#).
- [2] <http://www.vikinginspection.co.uk/services/heat-exchangers>
- [3] <http://www.pre-heat.com/industrial-shell-tube-heat-exchanger.html>
- [4] Lewińska - Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa 2001
- [5] <http://www.olympus-ims.com>
- [6] <http://www.instytutgamma.com.pl>
- [7] <http://www.innospection.com/pdfs/Multiple%20Frequency%20Eddy%20Current.pdf>
- [8] Upadhyaya, B. R., Hooper, W., Yan, W., Behraves, M. M., Henry, G. Advances in Information Processing in Eddy-Current Diagnostics of Steam Generator Tubing, Proceedings of the 9th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, 1995
- [9] Active Standard ASTM E2096 / E2096M
- [10] <http://www.dekra-certification.com.pl/>
- [11] <http://www.ewerest.pl> <http://www.alpinjet.pl>
- [12] [http://www.concoeast.pl/hydrodrill\\_metoda.html](http://www.concoeast.pl/hydrodrill_metoda.html)